

엇회전식 축류팬의 비정상 유동특성에 관한 실험적 연구

조이상* · 최현민* · 강정식** · 조진수***

Experimental Study on the Unsteady Flow Characteristics of the Counter-Rotating Axial Flow Fan

Leesang Cho* · Hyunmin Choi* · Jeongseek Kang** · Jinsoo Cho***

ABSTRACT

For the understanding of the complex flow characteristics in the counter-rotating axial flow fan, it is necessary to investigate the three-dimensional unsteady flow fields in the counter-rotating axial flow fan. This information is also essential for the prediction of the aerodynamic and acoustical characteristics of the counter-rotating axial flow fan.

Experimental study on the three-dimensional unsteady flow in the counter-rotating axial flow fan is carried out at the design point(operating condition). Three-dimensional unsteady flow fields in the counter rotating axial flow fan are measured at the cross-sectional planes of the upstream and downstream of each rotor using the 45° inclined hot-wire.

Three-dimensional unsteady flow fields in the counter-rotating axial flow such as the wake, the tip vortex and the tip leakage flow are shown the form of the velocity vectors and the velocity contours.

초 록

엇회전식 축류팬의 복잡한 유동특성을 이해하고 설계, 공력 해석 및 소음 특성 예측에 활용될 수 있는 3차원 비정상 유동장을 측정하였다. 엇회전식 축류팬의 3차원 비정상 유동장은 작동 영역인 설계점에서 45° 경사 열선을 이용하여 전단 동익의 전방, 전단 동익과 후단 동익 사이 그리고 후단 동익의 후방의 수직 유로 단면에서 측정되었다. 엇회전식 축류팬의 전단 동익과 후단 동익에 의해 발생하는 후류, 팁 와류 및 팁 누설 유동의 비정상 특성을 속도 벡터와 속도 윤곽을 통해 나타내었다.

Key Words: Counter-Rotating Axial Flow Fan(엇회전식 축류팬), Slanted Hot-Wire(경사 열선), Unsteady Flow(비정상 유동), Tip Leakage Flow(팁 누설 유동)

* 한양대학교 대학원 기계공학과
** 한국항공우주연구원 KHP엔진팀
*** 한양대학교 기계공학부
연락처, E-mail: jscho@hanyang.ac.kr

1. 서 론

엇회전식 축류팬(counter-rotating axial flow

fan)은 높은 정압상승을 필요로 하는 장소에 사용되는 2단 축류팬의 일종으로, 동심축상에서 서로 반대방향으로 회전하는 전단 동익과 후단 동익으로 구성되어있다[1].

엇회전식 축류팬은 고성능, 고효율의 성능특성으로 산업분야에서 널리 활용이 가능하지만, 상대적으로 높은 소음특성으로 아직까지 많이 이용되지 못하고 있는 실정이다[2]. 따라서, 엇회전식 축류팬의 폭넓은 활용을 위해서는 고효율, 저소음, 저진동 등의 성능 특성이 요구된다. 이를 위해서는 엇회전식 축류팬의 복잡한 3차원 비정상 유동특성에 대한 분석이 필요하며, 이것은 공력 특성 및 소음특성 예측에 필수적인 자료로 활용된다.

엇회전식 로터 시스템은 에너지 절감을 목적으로 미국 NASA에서 항공기 추진용 프로펠러로 개발되었고[3], Stepko와 Jeracki[4] 그리고 Dunham과 Gentry[5]은 엇회전식 프로펠러의 성능 및 유동장을 측정하였다. 최근에 Shin 등[6]은 엇회전식 프롭팬의 동익 상호작용으로 인해 발생하는 복잡한 유동현상을 규명하여 소음 특성 분석에 활용하고자 하였다. 엇회전식 축류팬의 고성능, 고효율의 성능 특성을 파악하기 위해 Kodama 등[7]은 성능 및 소음 특성을 측정하였다. 그리고, 최진용 등[8]과 박현수 등[9]은 엇회전식 축류팬의 성능 및 3차원 유동장을 분석하였다. 그러나 현재까지 엇회전식 축류팬의 설계 및 성능 예측에 필요한 3차원 비정상 유동장 및 동익 상호작용에 의한 블레이드 후류 특성에 대한 체계적인 연구가 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 엇회전식 축류팬의 복잡한 3차원 비정상 유동특성을 이해하고 설계, 공력 해석 및 소음 특성 예측에 활용될 수 있는 전단 동익과 후단 동익 블레이드에 의한 주기적인 3차원 비정상 유동장을 측정하였다.

2. 실험 장치

엇회전식 축류팬의 3차원 비정상 유동장을 측정하기 위한 실험 장치는 Fig. 1과 같이 제작되

었다. 엇회전식 축류팬의 입구에는 벨 마우스가 설치되었고 테스트 덕트 후방에는 작동조건 및 유량을 변화시키는 댐퍼가 장착되었다.

Figure 2는 엇회전식 축류팬의 전단 동익과 후단 동익 블레이드의 형상을 나타낸 것이다. 엇회전식 축류팬의 전단 동익과 후단 동익은 두개의 모터에 의해 동심축상에서 서로 반대방향으로 회전하며, 전단 동익의 블레이드 수는 8개, 후단 동익은 7개로 제작되었다.

Table 1은 엇회전식 축류팬의 전단 동익과 후단 동익 블레이드의 제원을 나타낸 것으로, 전단 및

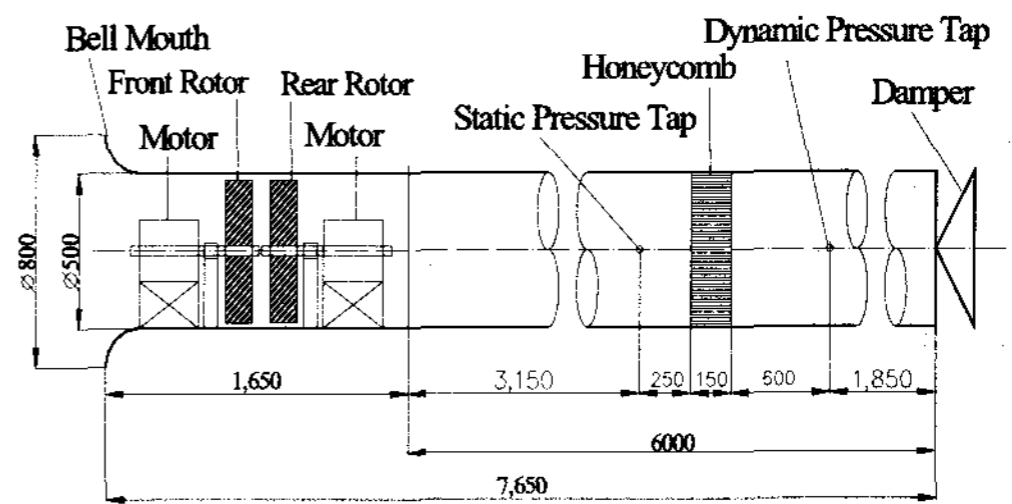
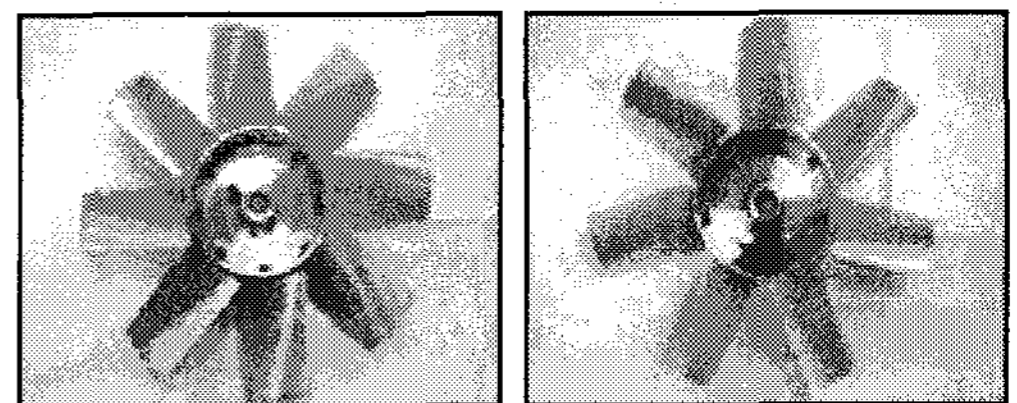


Fig. 1 Experimental apparatus(dimension: mm)



(a) Front rotor ($N_B = 8$) (b) Rear rotor ($N_B = 7$)

Fig. 2 Front view of the front rotor and the rear rotor of the counter-rotating axial flow fan[11]

Table 1. Specifications of rotor blades

	Front rotor	Rear rotor
Fan diameter	500mm	500mm
Tip diameter	497mm	497mm
Hub diameter	199mm	199mm
Airfoil	NACA65-series	
Camber angle	18.0 deg	
Thickness	10%	
Stagger angle at 0.75 radius	54.0 deg.	60.0 deg.
Solidity at 0.75 radius	0.8	0.7
Number of blades	8	7

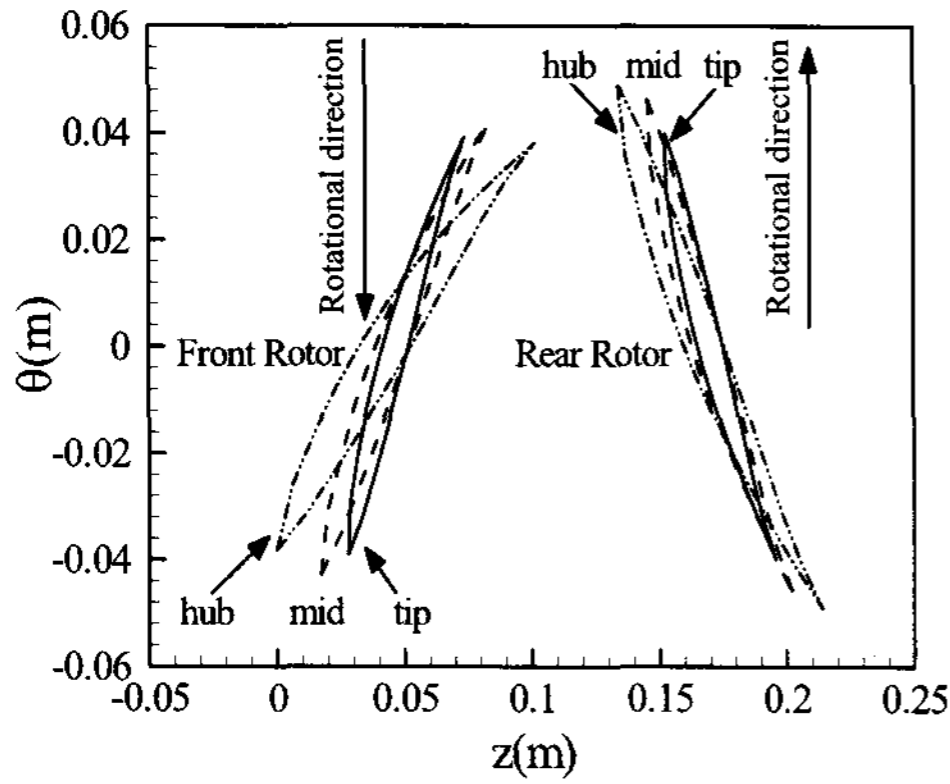


Fig. 3 Cross sectional blade shape of the counter-rotating axial flow fan

후단 동익의 허브비(r_{hub}/r_{tip})는 0.4이고, 블레이드 회전수는 1750rpm이다.

Figure 3은 엇회전식 축류팬의 전단 및 후단 동익 블레이드의 허브, 평균반경 그리고 팁부분에서의 단면 형상과 트위스트 분포를 나타낸 것으로, 회전방향은 서로 반대방향이다.

3. 실험 방법

3.1 경사열선 프로브의 보정실험

엇회전식 축류팬의 3차원 비정상 유동장을 측정하기 위해 45° 경사 열선을 사용하였다. Fig. 4는 45° 경사 열선의 형상을 나타낸 것으로, 경사 열선의 프로브 각 θ_0 는 좌표축과 단위 벡터 \vec{A} 가 이루는 각이다.

45° 경사 열선의 유동 벡터와 열선 벡터 사이의 관계식은 다음과 같다[10].

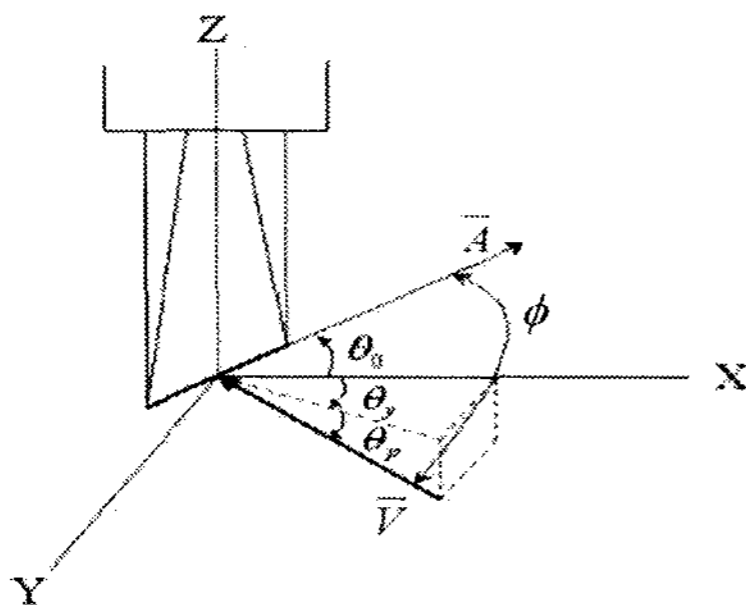


Fig. 4 Geometry of the 45° slanted hot-wire[10]

$$\cos \phi = \cos \theta_o \cdot \cos \theta_p \cdot \cos \theta_y + \sin \theta_o \cdot \sin \theta_p \quad (1)$$

여기서, θ_p 는 열선 프로브의 피치각, θ_y 는 요각 그리고 ϕ 는 열선 프로브의 절대 유동각이다.

엇회전식 축류팬의 3차원 비정상 유동장을 측정하기 위한 45° 경사 열선의 보정 실험은 난류 강도가 0.13%인 개방형 아음속 풍동에서 Grand와 Kool[11]의 방법을 이용하였다.

45° 경사 열선과 유동이 수직상태에 있는 경우, 유효 냉각속도와 열선 유속계의 전압과의 관계[10]는 다음과 같다.

$$E^2 = A + B \cdot V_e^n \quad (2)$$

여기서, E 는 전압, V_e 는 유효 냉각속도를 나타내며, A, B, n 은 유동 속도와 전압과의 곡선 적합(curve fitting)으로 얻어지는 보정 계수이다.

Grande와 Kool[11]은 유효 냉각속도와 실제 유동의 속도비를 45° 경사 열선의 피치각, 요각 및 유동각의 함수로 가정하여 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$\frac{V_e}{V} = \cos \psi \quad (3)$$

$$\sin \psi = A_2 \cdot \cos \theta_p \cdot \cos \left(\frac{\theta_y}{A_1} \right) + A_2 \cdot \tan \theta_o \cdot \sin \theta_p \quad (4)$$

여기서, ψ 는 프로브 요각의 보정 실험을 통해 얻어지는 매개 변수이고, A_1, A_2 는 각각 열선 프로브 각의 보정 계수이다.

3.2 3차원 비정상 유동측정 실험

엇회전식 축류팬의 3차원 비정상 유동장은 Fig. 5와 같이, 전단 동익의 전방(Station 1), 전단 동익과 후단 동익 사이(Station 2) 그리고 후단 동익의 후방(Station 3)의 수직 유로 단면에서 측정되었다. 엇회전식 축류팬의 수직 유로 단면에서 반경방향으로 총 23개 지점, 원주 방향으로 0.5도 간격으로 측정되었다.

엇회전식 축류팬의 주기적인 난동 성분을 포함한 3차원 비정상 속도성분을 측정하기 위해, Whitfield 등[12]의 회전 열선법을 이용하여 측정 위치에서 45° 경사 열선의 요각을 120° 간격으로 3번 회전시키면서 각 방향에 대한 주기적인 신호를 획득하였다.

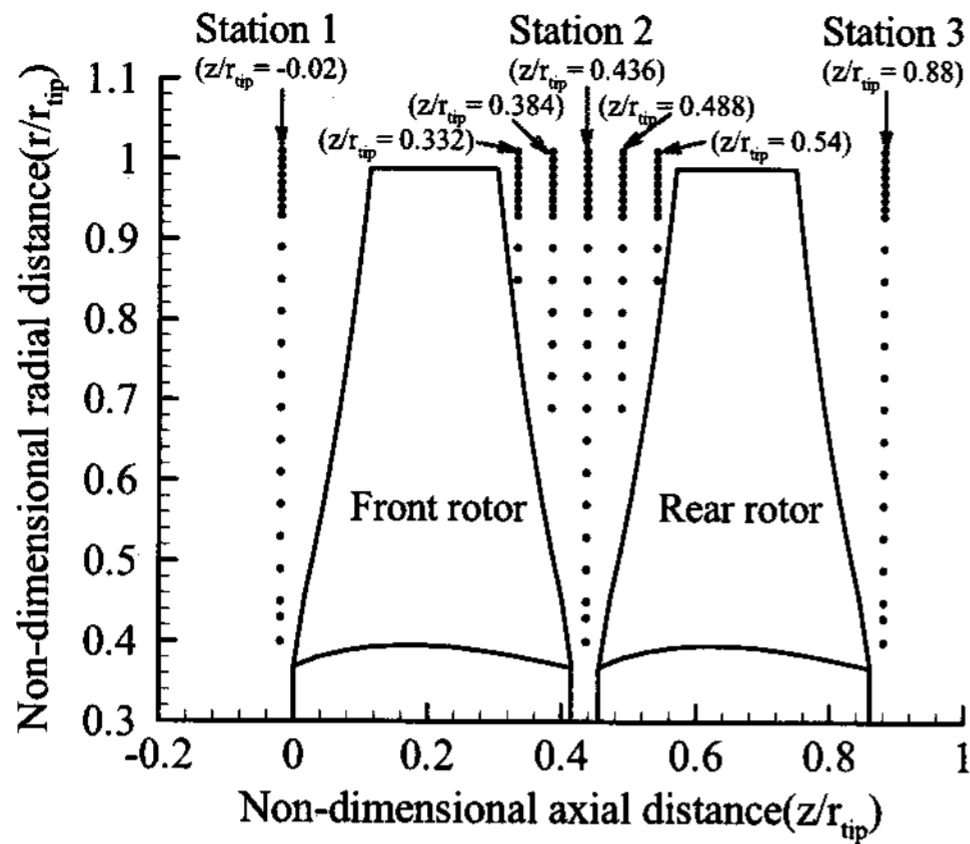


Fig. 5 Unsteady flow measuring positions of the counter-rotating axial flow fan

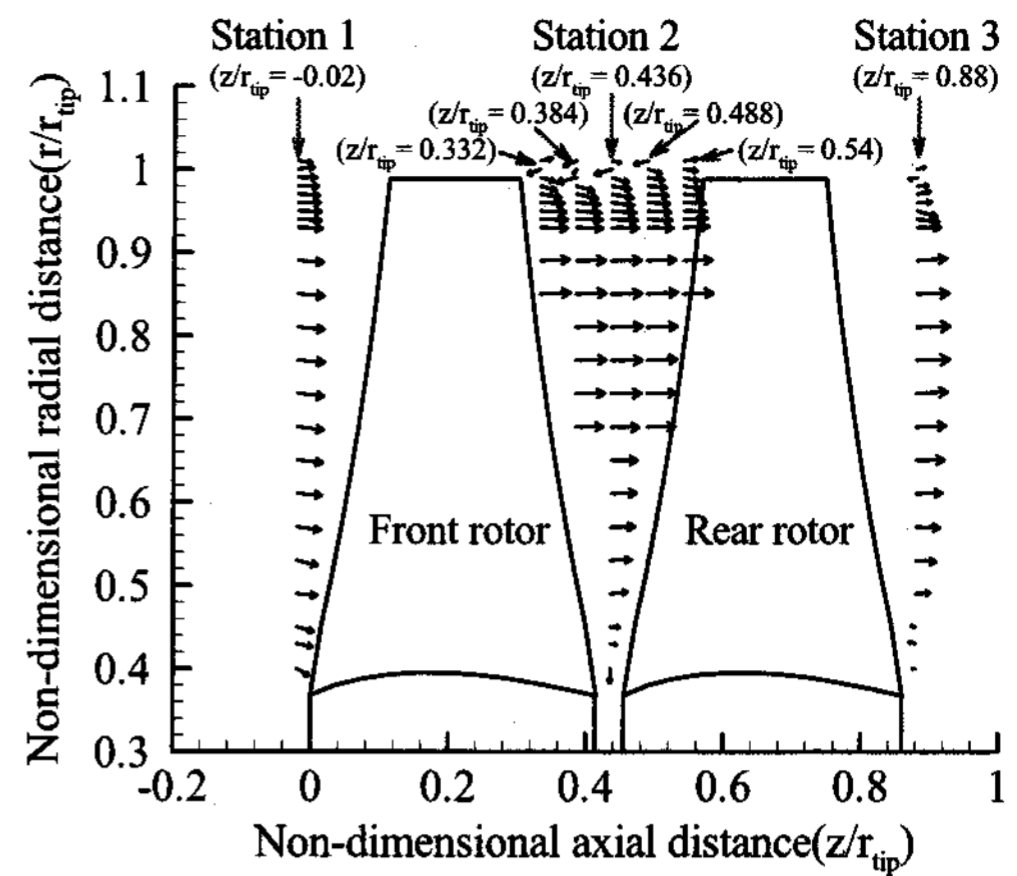


Fig. 7 Circumferential averaged axial and radial velocity vectors of the counter-rotating axial flow fan

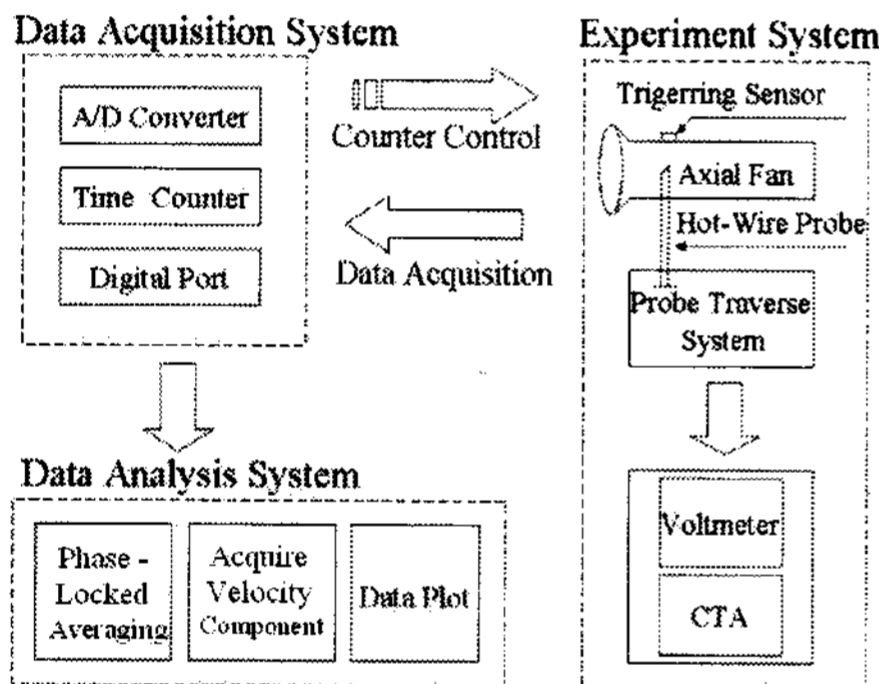


Fig. 6 Schematic diagram of instrumentation for the 45° slanted hot-wire

Figure 6은 45° 경사 열선을 이용하여 엇회전식 축류팬의 비정상 유동장에 대한 데이터 획득 과정을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 엇회전식 축류팬의 동익 블레이드가 회전할 때 동일한 위치에서 유동장에 대한 전압 데이터를 획득하도록 스톱 트리거를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

엇회전식 축류팬의 3차원 비정상 유동장은 전단 동익의 입구, 전단 동익과 후단 동익 사이 그리고 후단 동익 출구에서 분석되었다.

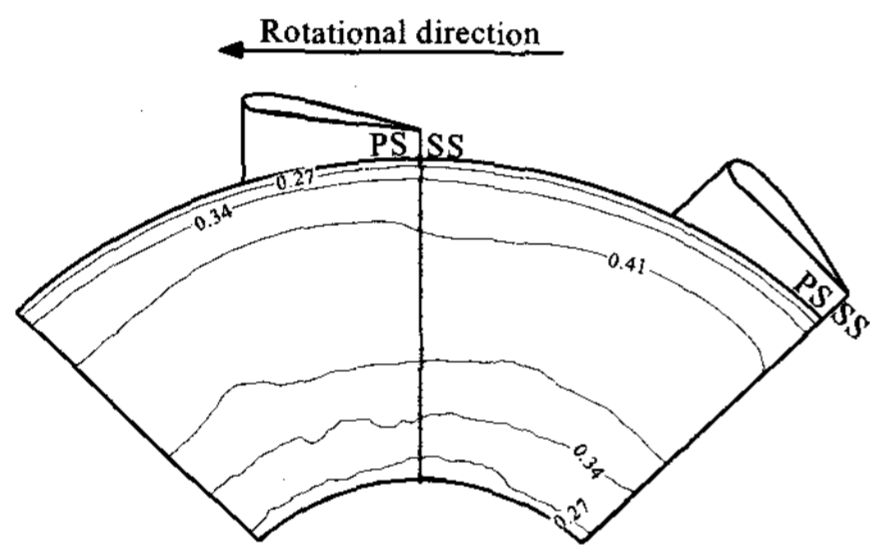
Figure 7은 엇회전식 축류팬의 관통유동 특성을 알아보기 위해 축방향 속도성분과 반경방향

속도성분을 원주방향으로 시간 평균한 결과이다. 그림에서 보면, 엇회전식 축류팬의 전단 동익 전방인 Station 1($z/r_{tip} = -0.02$)에서의 입구 유동은 덕트 케이싱의 경계층 영향을 제외하고는 블레이드 허브에서 팁 부분까지 비교적 균일한 유동 특성을 나타내었다. 전단 동익과 후단 동익 사이의 유로인 Station 2에서는 전단 동익의 회전에 의해 발생한 팁 와류의 영향으로 $z/r_{tip} = 0.488$ 부분까지 축방향 속도성분이 크게 감소하였다. 그리고, Station 3($z/r_{tip} = 0.88$)인 후단 동익의 후방에서는 전단 동익과 후단 동익의 중간 위치인 $z/r_{tip} = 0.436$ 에서와 유사하게 팁 와류에 의해 유동손실이 발생하였다.

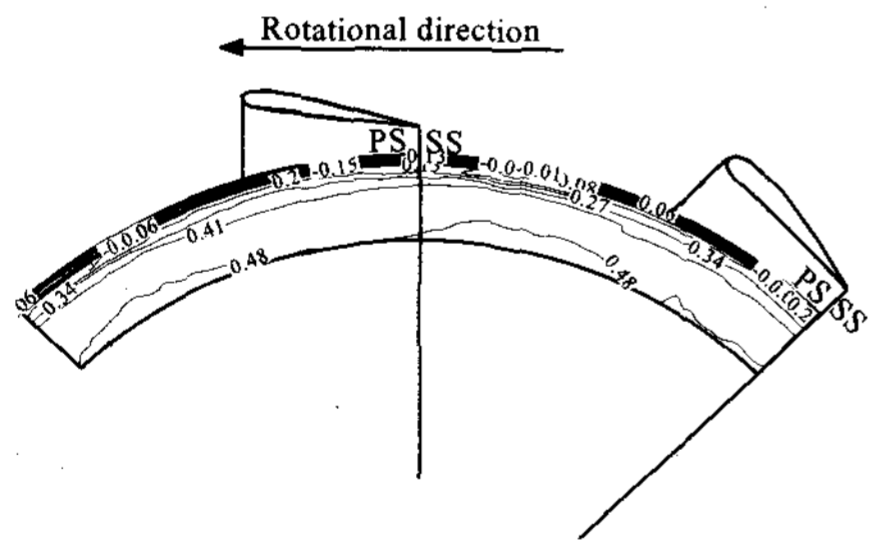
Figure 8은 엇회전식 축류팬의 전단 동익의 전방, 전단 동익과 후단 동익 사이 그리고 후단 동익 후방에서 축방향 속도분포를 블레이드 회전 속도로 무차원한 윤곽(contour)을 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 전단 동익의 전방에서 측정된 결과로, 전단 동익 블레이드의 평균반경에서 축방향 속도 성분이 가장 크게 나타났고, 허브와 팁 부분에서는 상대적으로 축방향 속도성분이 감소하였다. Fig. 8(b)는 전단 동익 블레이드의 후연 바로 후방의 축방향 속도분포를 나타낸 것으로, 블레이드 팁 부분($r/r_{tip} = 0.99$)에서는 팁 와류와

팁 누설 유동에 의해 음(-)의 축방향 속도가 발생하거나 축방향 속도가 크게 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 팁 부분에서의 축방향 속도 분포는 Fig. 8(e)인 Station 2-4($z/r_{tip} = 0.488$)에서 까지 유사한 경향을 나타내었다. Fig. 8(f)에서 보면, 전단 동익 블레이드에 의한 팁 와류와 팁 누설 유동의 영향이 거의 없고, 후단 동익의 흡입 영향으로 블레이드 팁 부분에서도 축방향 속도성분이 다소 증가함을 알 수 있었다. Fig. 8(g)는 후단 동익의 후방에서 측정된 축방향 속도분포를 나타낸 것으로, 벽면 경계층 효과에 의해 다른 수직 유로단면에 비해 블레이드 팁에서 축방향 속도성분이 크게 감소하였고, 평균반경에서는 축방향 속도가 가장 크게 증가하였다. 또한,

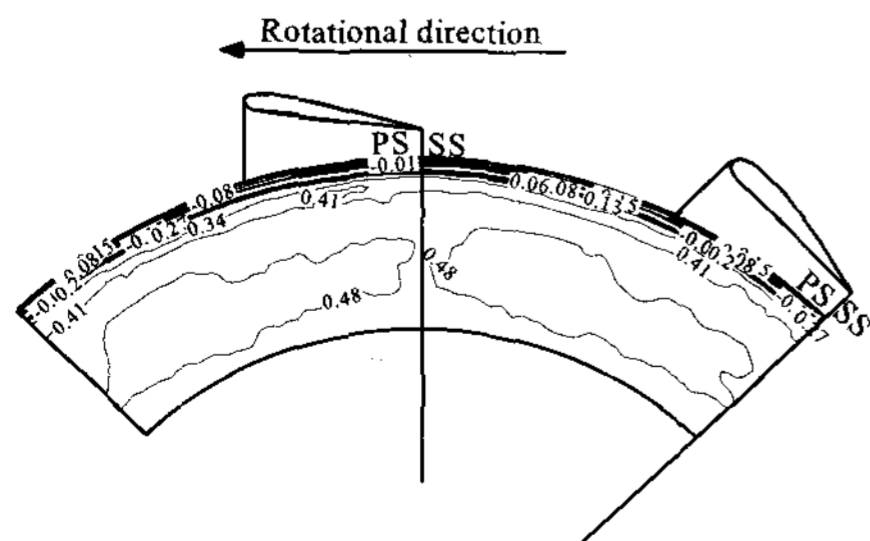
전단 동익의 전방과 후방에서와 달리 축방향 속도성분이 비주기적인 특성을 나타내었다. 이것은 전단 동익 블레이드 수와 후단 동익 블레이드 수의 차이에 의해 발생된 결과로 후단 동익 출구 유동의 비정상 특성이 크게 발생하였다.



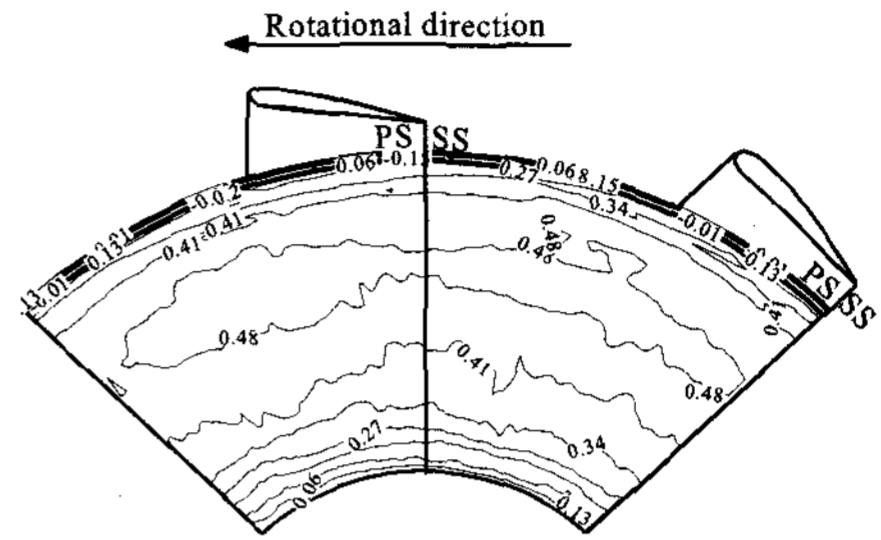
(a) Station 1 ($z/r_{tip} = -0.02$)



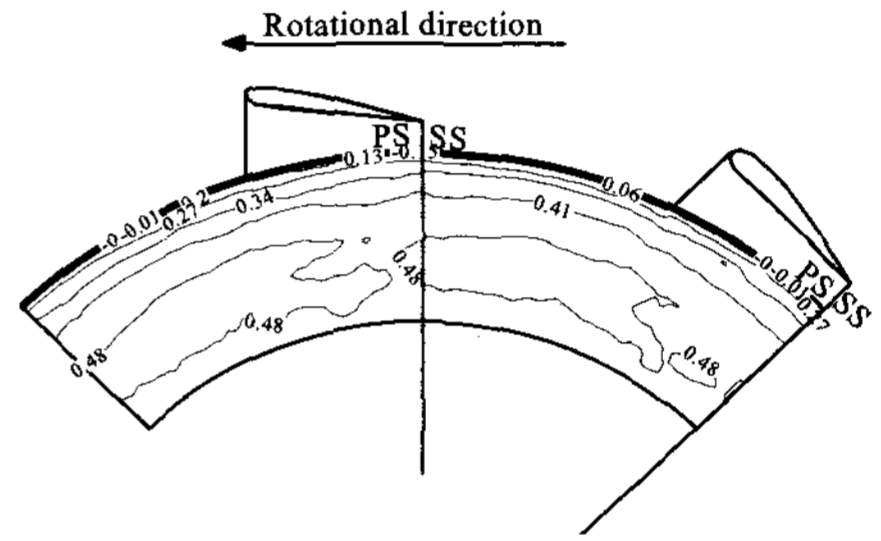
(b) Station 2-1 ($z/r_{tip} = 0.332$)



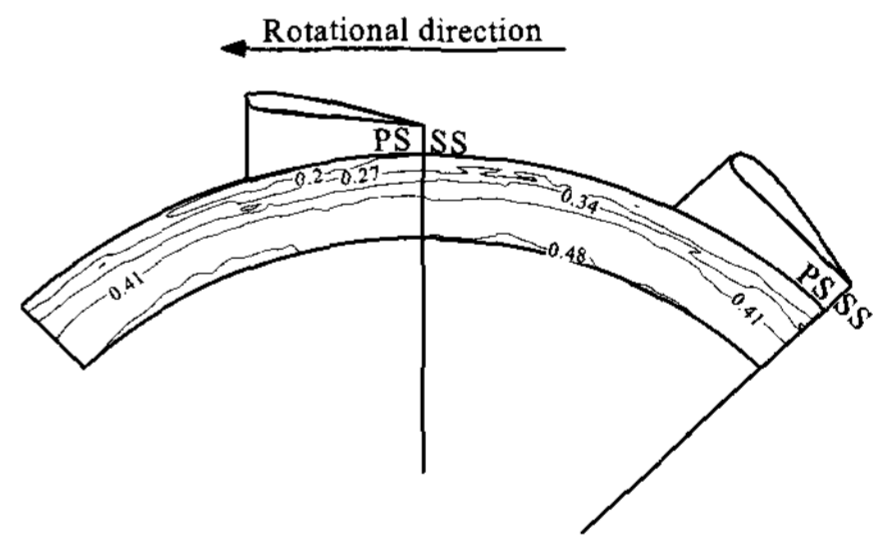
(c) Station 2-2 ($z/r_{tip} = 0.384$)



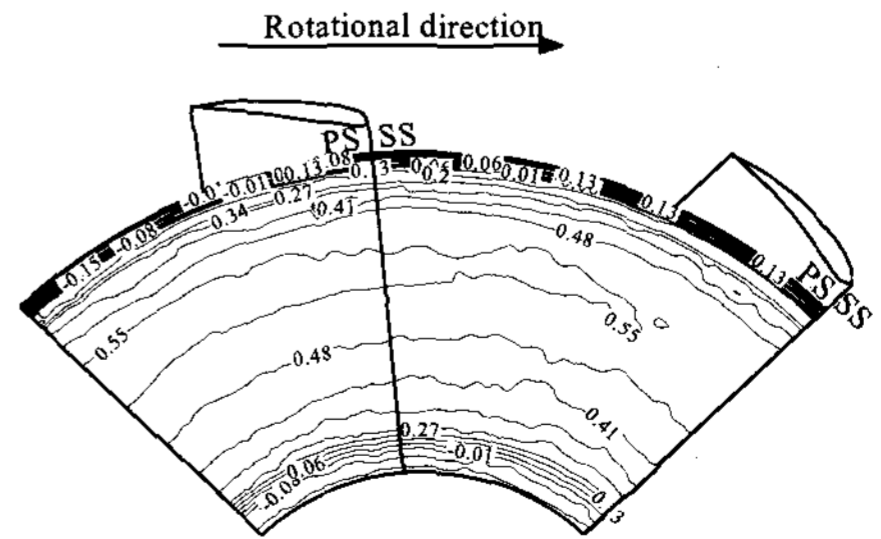
(d) Station 2-3 ($z/r_{tip} = 0.436$)



(e) Station 2-4 ($z/r_{tip} = 0.488$)



(f) Station 2-5 ($z/r_{tip} = 0.54$)



(g) Station 3 ($z/r_{tip} = 0.88$)

Fig. 8 Axial velocity contours of the counter-rotating axial flow fan

5. 결 론

본 연구에서는 엇회전식 축류팬의 3차원 비정상 유동장을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

엇회전식 축류팬의 전단 동익의 회전에 의해 발생된 팁 와류와 팁 누설 유동에 의한 영향으로 음(-)의 축방향 속도가 발생하거나 축방향 속도 성분이 크게 감소하는 경향이 Station 2-4 ($z/r_{tip} = 0.488$)인 후단 동익의 전방 부근까지 발생함을 확인하였다. 또한, 엇회전식 축류팬의 후단 동익의 후방에서는 전단 동익의 전방과 후방에서와 달리 전단 동익과 후단 동익 블레이드 수의 차이에 의해 축방향 속도성분이 비주기적이며, 비정상 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 한국형헬기 민군겸용구성품개발사업(KARI주관) 위탁연구결과 중 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Wallis, R. A., Axial Flow Fans and Ducts, John Wiley & Sons Inc., 1983
2. Bleier, F. P., Fan Handbook, McGraw-Hill, New York, 1998
3. Strack, W. C., Knip, G., Weisbrich, A. L., Godston, J., and Bradley, E., "Technology and Benefits of Aircraft Counter Rotation Propellers," NASA TM 82983, 1982
4. Stepko, G. and Jeracki, R., "Wind-Tunnel Results of Advanced High-Speed Propellers at Takeoff, Climb, and Landing Mach Numbers," NASA TM 87030, 1982
5. Dunham, D. and Gentry, G. Jr., "Low-Speed Wind-Tunnel Tests of Single- and Counter-Rotation Propellers," NASA TM 87656, 1986
6. Shin, H., Charlotte, E., Whitfield, C. and David, C., "Rotor-Rotor Interaction for Counter-Rotating Fans, Part 1 : Three-Dimensional Flow Field Measurements," AIAA, Vol. 32, No. 11, 1994, pp. 2224~2233
7. Kodama, Y., Hayashi, H., Fukano, T., and Tanaka, K., "Experimental Study on the Characteristics of Fluid Dynamics and Noise of a Counter Rotating Fan," 일본기계학회 논문집 B편, 60권, 576호, 1994, pp. 2764~2771
8. 최진용, 조이상, 조진수, 원유필, "엇회전식 축류 팬의 공력특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집 B권, 제 26권, 제 2호, 2002, pp. 201~210
9. 박현수, 조이상, 조진수, "엇회전식 축류팬의 3차원 비정상 유동에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집 B권, 제 28권, 제 9호, 2004, pp. 1005~1014
10. Lakshminarayana, B. and David, R., "Mean Velocity and Decay Characteristics of the Guidevane and Stator Blade Wake of an Axial Flow Compressor," Journal of Engineering for Power, Vol. 102, 1980, pp. 50~60
11. Grande, G. and Kool, P., "An Improved Experimental Method to Determine the Complete Reynolds Stress Tensor with a Single Rotating Slanting Hot wire," The Institute of Physics, Vol. 14, 1981, pp. 196~201
12. Whitfield, C., Kelly, J. C. and Barry, B., "A Three Dimensional Analysis of Rotor Wakes," Aero Quarterly, Vol. 23, Part 4, 1972